УДК 621.762.002

Ю.М. ВЕРНИГОРОВ, И.Н. ЕГОРОВ, С.И. ЕГОРОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ПОРОШКОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕЛЬНИЦЕ УДАРНОГО ТИПА

Представлена модель, с помощью которой можно прогнозировать гранулометрический состав порошка при измельчении в магнитовибрирующем слое в мельнице ударного типа с учетом начальных условий, времени измельчения и градиента индукции переменного магнитного поля. Показано согласие модели с экспериментальными результатами.
Ключевые слова: *магнитовибрирующий слой, механическое измельчение, магнитные порошки, моделирование эксперимента.*

Введение. Одним из способов, нашедших промышленное применение, является механическое измельчение хрупких материалов. В связи с этим большой интерес представляет прогнозирование влияния внешних воздействий на процесс измельчения с целью повышения производительности помола и управление процессом получения шихты заданного гранулометрического состава.

Частицы порошков магнитных материалов из-за магнитостатического взаимодействия объединяются во флокулы. Для таких порошков применяется магнитовибрационная технология [1], по которой в мельнице ударного типа в области измельчения создается магнитовибрирующий слой, представляющий собой динамически устойчивое взвешенное состояние ферромагнитного порошка в электромагнитном поле [2].

Целью настоящей работы является прогнозирование гранулометрического состава порошка, измельчаемого в мельнице ударного типа при создании магнитовибрирующего слоя, в зависимости от времени помола и параметров электромагнитного воздействия.

Эксперимент. Мельницу ударного типа помещали в общее межполюсное пространство двух электромагнитов, создающих постоянное и неоднородное переменное магнитные поля с взаимно перпендикулярными силовыми линиями. Плоскости вращения бил в мельнице располагались параллельно силовым линиям электромагнитного поля [3]. В процессе измельчения порошок удерживался и перемешивался электромагнитным полем [4] в зоне вращающихся с частотой 15000 об/мин бил.

Измельчали порошок феррита бария фракционного состава: -50 мкм – 0,15 %; +50-83 мкм – 1,51 %; +83-200 мкм – 10,62 %; +200-400 мкм – 21,11 % и +400-500 мкм – 66,61 % в мельнице без элек-

тромагнитного воздействия (режим 0) и в постоянном поле с индукцией B_c =15,4 мТ, переменном со значениями градиента индукции $\frac{\partial B}{\partial y}$: 27,6 мТ (режим 1), 75,0 мТ/м (режим 2) и 90,0 мТ/м (режим 3). Параметры магнитных полей обеспечивали динамическую устойчивость магнитовибрирующего слоя. Порошок измельчали в течение 20 минут, при этом через определенные интервалы времени отбирали пробы для исследования гранулометрического состава. По экспериментальным данным строились кумулятивные вероятностные кривые распределения частиц по размерам, графическое изображение которых дает возможность оценить влияние электромагнитного воздействия на динамику дисперсного состава ферритбариевого порошка от времени помола уже на начальных этапах измельчения.

Математическое моделирование эксперимента. С целью моделирования эксперимента по измельчению порошков в МВС в мельнице исследовались кумулятивные вероятностные кривые распределения частиц по размерам с использованием программного пакета математической обработки данных Origin 6.1. Аппроксимация заключалась в подборе значений свободных параметров в формуле, которые минимизируют среднеквадратичное отклонение точек аппроксимирующей функции от экспериментальных данных. Функция $\frac{\Delta n}{n} = f(d)$, наилучшим образом удовлетворяющая этим условиям, имеет вид

$$\frac{\Delta n}{n} = 100 \cdot \frac{d^m}{k^m + d^m}, \qquad (1)$$

где $\frac{\Delta n}{n}$ – процент содержания фракции в измеряемой выборке порошка (%); d – размер фракции (мкм); k и m – аппроксимационные параметры.

На рис. 1 показаны результаты совместной аппроксимации серий экспериментальных данных по измельчению порошка феррита бария для времен помола 0,5 (а); 2,5 (б); 6 (в); 10 (г) и 20 (д) мин при различных градиентах индукции переменного магнитного поля. Совместная аппроксимация соответствует подбору единых для нескольких кривых параметров, минимизирующих сумму среднеквадратических отклонений аппроксимирующих функций от экспериментальных точек. Из рис. 1 (а-д) следует согласие аппроксимирующих функций и экспериментальных данных независимо от времени измельчения и режимов электромагнитного воздействия на порошок в мельнице.

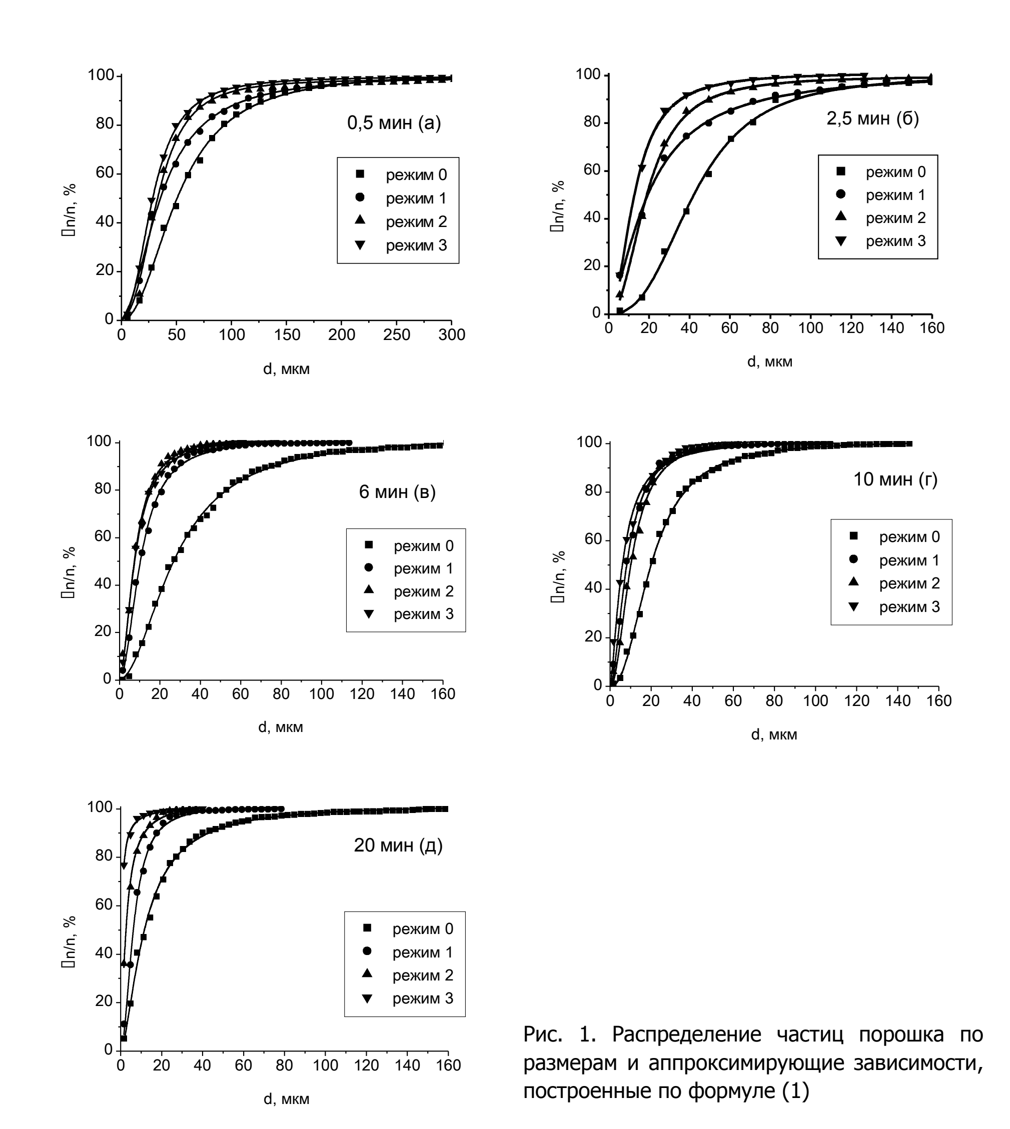


Рис. 1. Распределение частиц порошка по размерам и аппроксимирующие зависимости, построенные по формуле (1)

Из сравнения графического изображения зависимостей следует, что измельчение в режиме создания устойчивого магнитовибрирующего слоя уже через 6 минут обеспечивает меньшую степень рассеивания гранулометрического состава по сравнению с измельчением без электромагнитного поля. Через 20 минут измельчения в режиме 0 степень помола 4,4; в режиме 1– 9,3; в режиме 2 – 15,8; в режиме 3 – 29,4. При измельчении в поле с градиентом индукции 90,0 мТ/м (режим 3) степень помола возрастает в 5,8 раза по сравнению с измельчением без электромагнитного воздействия в режиме 0. Следовательно, степень помола возрастает с увеличением не только длительности процесса измельчения, но и градиента индукции переменного магнитного поля. С ростом градиента индукции переменного магнитного поля увеличивается сила, действующая на частицы и флокулы, что приводит к возрастанию интен-

сивности движения порошка и увеличению числа столкновений частиц между собой (самоизмельчение) и с билами. Очевидно, что с уменьшением размера частиц порошка роль самоизмельчения возрастает.

С учетом факторов, влияющих на процесс измельчения порошка в мельнице, характера изменения гранулометрического состава измельчаемого порошка со временем и при изменении градиента индукции переменного магнитного поля на основе уравнения (1) составлена функциональная зависимость распределения порошка по крупности в виде

$$\frac{\Delta n}{n} = 100 \cdot \frac{d^2}{\left(\dfrac{1}{a + bt + ct\dfrac{\partial B}{\partial y}}\right)^2 + d^2}, \qquad (2)$$

где t – время измельчения порошка (мин); $\frac{\partial B}{\partial y}$ – градиент индукции переменного магнитного поля (Т/м), используемого при создании магнитовибрирующего слоя; a – параметр, соответствующий начальным условиям, т.е. гранулометрическому составу порошка до помола; параметр b отвечает за интенсивность измельчения за счет ударного действия бил, параметр c – за вклад процессов дополнительного перемешивания порошка, дефлокуляции и самоизмельчения, вызванных воздействием электромагнитного поля.

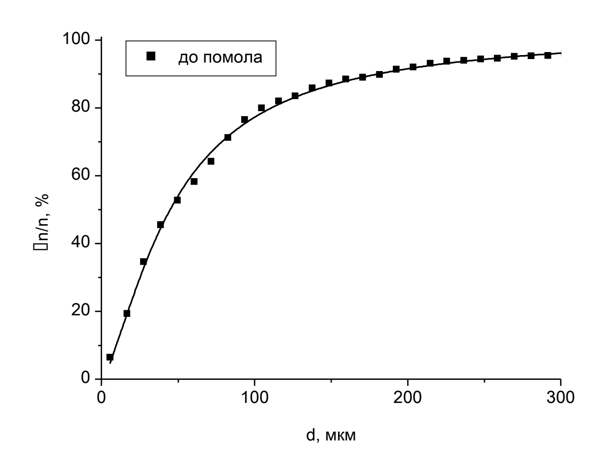


Рис. 2. Распределение частиц порошка по размерам
и аппроксимирующая зависимость для определения параметра a

Параметр a определяется путем аппроксимации кумулятивного распределения частиц порошка по размерам до помола (рис. 2). Он остается фиксированным для уравнений, по которым аппроксимируются распределения измельчаемого порошка. Так, в рассматриваемом случае для порошка феррита бария он равен 0,02.

Параметр b определялся из совместной аппроксимации серии распределений, построенных по экспериментальным данным, полученным при измельчении порошка феррита бария в ударной мельнице без электромагнитного воздействия (рис. 3). Найденное значение b, равное 0,003, едино для всех аппроксимирующих функций, соответствующих помолу без электромагнитного воздействия, и фиксируется для помола в магнитовибрирующем слое.

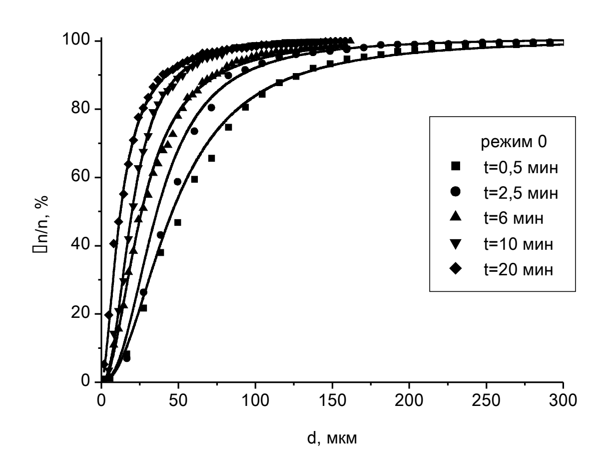
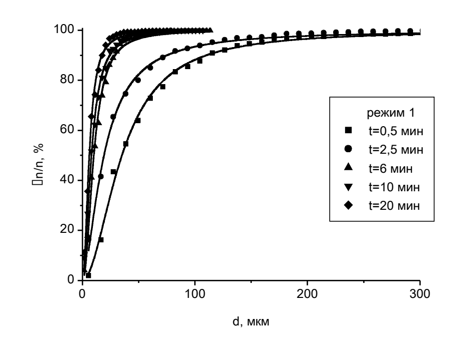


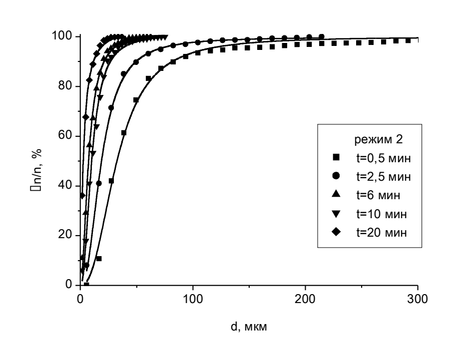
Рис. 3. Распределение частиц порошка по размерам и аппроксимирующие зависимости, построенные для определения параметра b

Определив параметры (a и b), соответствующие начальным условиям и интенсивности измельчения порошка за счет ударного действия бил, используем полученное уравнение (2) для аппроксимации кумулятивных распределений, соответствующих помолу порошка в магнитовибрирующем слое. Проведя совместную аппроксимацию экспериментальных данных по измельчению без магнитного поля (режим 0) и в магнитном поле (режимы 1 – 3) для различного времени помола (0,5; 2,5; 6; 10 и 20 мин), определили общий аппроксимационный коэффициент $c = 0,25$.

На рис. 4 отражены результаты аппроксимации экспериментальных данных по измельчению феррита бария в ударной мельнице в магнитовибрирующем слое по формуле (2) с коэффициентами $a = 0,02$; $b = 0,003$; $c = 0,25$.

Установленные зависимости позволяют прогнозировать гранулометрический состав порошка, получаемого при измельчении в магнитовибрирующем слое. При уменьшении крупности исходного порошка будет увеличиваться значение параметра a, скорость вращения бил влияет на параметр b, а вклад самоизмельчения будет увеличиваться при уменьшении размеров частиц порошка, что повлечет рост значения c.





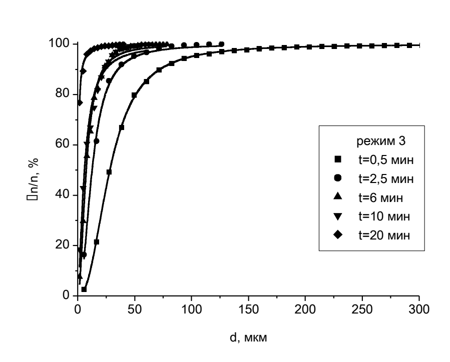


Рис. 4. Распределение частиц порошка по размерам и аппроксимирующие зависимости, построенные по формуле (2)

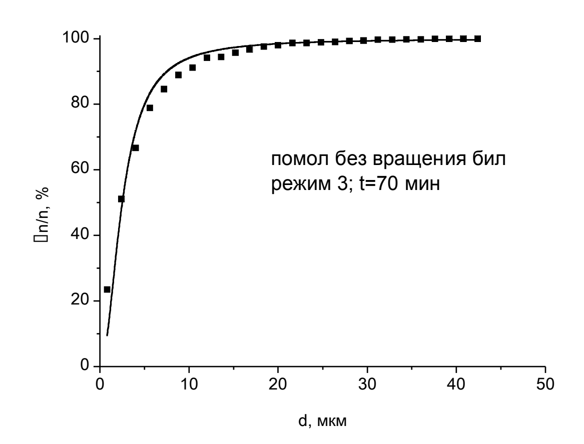


Рис. 5. Распределение частиц порошка по размерам
и зависимость, построенная по формуле (2) с определенными коэффициентами

Для дополнительной проверки описательных возможностей модели построили функциональную зависимость процентного содержания фракций в измеряемой выборке порошка от размера частиц по формуле (2) без учета ударного действия бил (b =0) для параметров: a = 0,02; c =0,25; $\frac{\partial B}{\partial y}$ =90,0 мТ/м и времени измельчения 70 мин (рис.5). Измельчали поро-

шок в мельнице при создании магнитовибрирующего слоя в режиме, используемом при построении теоретической зависимости, предварительно исключив из конструкции била. В этом случае измельчение порошка осуществляется только за счет соударения частиц между собой и со стенками камеры. Расчетная зависимость совпадает с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 5% (см. рис.5). Полученные результаты показывают, что данная модель учитывает вклад в процесс измельчения воздействия бил и магнитного поля.

Выводы. Предложенная модель подтверждена результатами эсперимента и позволяет определять необходимые условия при измельчении порошка в магнитовибрирующем слое для получения заданного гранулометрического состава.

Библиографический список

1. Вернигоров Ю. М., Егорова С. И., Лемешко Г.Ф. Влияние режимов магнитокипения на степень разрушения флокул тонкодисперсных порошков // Порошковая металлургия.- 1990.- № 9.- С. 83-87.
2. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. Disperse ferromagnet in the magnetovibrating layer // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 2005, V. 290-291.- P. 1177-1180.
3. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. The application of a magnetovibrating layer to the milling of ferromagnetic materials // Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings, Vol. 1, 2-5 October, Prague, Czech Republic, 2005.- P.451-455.
4. Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н., Егорова С.И. Особенности флокуляции полидисперсных порошков магнитотвердых материалов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.- 2006. - №2.- С. 64-68.

Материал поступил в редакцию 08.11.06.

Yu. M. VERNIGOROV, I.N. EGOROV, S.I. EGOROVA

THE MODELING OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DEPENDENCY WHEN MILLING MAGNETIC POWDER USING BEATER MILL

The model that allows forecasting of particle size distribution when milling magnetic powder in the magnetovibrating layer using beater mill was proposed. Model arguments are initial grain size distribution, milling time and variable magnetic field gradient. The correlation of model with experimental results is shown.

ВЕРНИГОРОВ Юрий Михайлович (р. 1941), доктор технических наук (1995), профессор кафедры физики ДГТУ. Окончил РГУ (1964) по специальности «Радиофизика».

Научные интересы: порошковая металлургия, взаимодействие дисперсных магнитных систем в электромагнитном поле.
Имеет более 100 научных публикаций.

ЕГОРОВ Иван Николаевич (р. 1982), аспирант кафедры физики ДГТУ.
Имеет 15 научных публикаций в области магнитовибрационной технологии.

ЕГОРОВА Светлана Ивановна, кандидат технических наук (1992), доцент кафедры физики ДГТУ. Окончила РГУ (1978) по специальности «Физика».
Область научных интересов: порошковая металлургия и исследование магнитных материалов.
Имеет более 50 научных публикаций.